

**Título: Controle automático de  
temperatura de um sistema de  
aquecimento de água**

## **Agradecimentos**

Agradecemos às nossas mães, amigos e ao nosso grande orientador Professor Dr. Marco Antônio Meggiolaro.

## Índice

1 – Introdução	8
1.1 Aquecimento da água por meio de resistência elétrica	9
1.2 Aquecimento da água a chama	11
1.2.1 Acendimento Manual	12
1.2.2 Acendimento Automático	13
1.2.3 Acendimento Eletrônico	13
1.3 Outras formas de controle	14
1.4 Característica da dissertação	15
2 - Fundamentos teóricos	17
2.1 PID	17
2.1.1 Ação Proporcional	18
2.1.2 Ação Proporcional – Integral	19
2.1.3 Ação Proporcional – Derivativa	20
2.1.4 Ação Proporcional - Integral – Derivativa	21
2.2 Termopar	24
3. Desenvolvimento	27
3.1 Montagem de protótipo	27
3.2 Medição de temperatura	28
3.3 Utilização do termopar	31
3.4 Controle PID	33
3.5 Procedimento experimental	36

4. Resultados	38
5. Conclusões	41
6. Bibliografia	43
Apêndice 1	44

## **Lista de ilustrações**

Figura 1: Desenho ilustrativo do chuveiro elétrico convencional

Figura 2: Chuveiro elétrico com controlador de temperatura manual

Figura 3: Aquecedor de água à chama com controlador de temperatura eletrônico

Figura 4: Vista em corte de válvula controladora de temperatura

Figura 5: Diagrama esquemático do sistema hidráulico

Figura 6: Circuito elétrico utilizado para amplificar o sinal do termopar.

## **Lista de tabelas**

Tabela 1: Efeitos na resposta, do sistema em cadeia fechada, de adicionar os modos proporcional, integral e derivativo.

Tabela 2: Ângulo de abertura da válvula x temperatura

## **Resumo**

Este projeto resolve um problema do cotidiano de muitas pessoas. Quem nunca ficou horas tentando controlar a temperatura do seu chuveiro? Quem nunca esteve no banho e acabou sendo queimado com a água que ficou muito quente de uma hora para outra? Esses problemas foram resolvidos com uma “válvula inteligente”, uma válvula que aumenta ou diminui a vazão de água fria e com isso mantém a temperatura desejada automaticamente sem que o usuário tenha que se preocupar com isso. Imagine como seria bom se o indivíduo pudesse, antes de entrar no banho, escolher a temperatura da água e que essa temperatura se mantivesse constante. Esse equipamento é de baixo custo, seguro e estável. O equipamento consiste em uma válvula montada solidária a um motor comum, este por sua vez é controlado por um sistema PID que recebe a informação de um termopar localizado logo após a mistura. O equipamento funciona de forma contínua e dinâmica.

## **1. Introdução:**

Este projeto possui como objetivo elaborar um sistema de controle de temperatura de água em chuveiros domésticos visando resolver um problema existente no cotidiano de diversas pessoas.

É fato que uma parcela da população tem como hábito diário tomar banho, e nessa atividade enfrentam-se dificuldades para manter a temperatura que é considerada de “conforto” pois o usuário tem que ficar ajustando a quantidade de água fria e quente que deve entrar na mistura para enfim conseguir a temperatura que o agrada. É exatamente nesse ponto que o projeto que será apresentado vai agir, isto é, será apresentado um sistema que controlará a vazão de água fria que vai para mistura para desta maneira manter a temperatura ideal mesmo com qualquer modificação nas características do processo.

Outro problema que deve ser solucionado é o desperdício de água que ocorre enquanto o usuário procura a regulagem exata do chuveiro. Considerando os apelos ambientais dos órgãos responsáveis em economizar água, a solução desse problema acarretaria em uma significativa medida para este fim.

Espera-se que o equipamento em questão consiga num primeiro momento ajustar a temperatura inicial da água e também manter essa temperatura durante o banho. Para simular a situação real do indivíduo em sua casa foi construído um protótipo que apresenta algumas limitações, a primeira delas é que no protótipo utilizado a água será aquecida com um aquecedor elétrico e assim não será testado na prática o aquecedor à chama ou qualquer outro tipo de aquecedor. Outra limitação é em relação ao gradiente de temperatura que não será muito alto e isso pode causar diferenças no caso real pois uma diferença de temperatura mais acentuada poderia apresentar modificações não esperadas no equipamento.



Existem no mercado soluções similares de controle de temperatura. Serão apresentadas abaixo as principais formas de aquecimento de água para uso residencial e seus respectivos sistemas de controle.

- Aquecimento da água por meio de resistência elétrica;
- Aquecimento da água a chama;
- Outros.

### 1.1 Aquecimento da água por meio de resistência elétrica

O chuveiro elétrico consiste em uma resistência, que nada mais é do que um fio da espessura de um arame fino, enrolado. Esta resistência (ou o fio enrolado) fica mergulhada na água dentro do chuveiro. Mesmo sem estar em funcionamento, sempre haverá água dentro do chuveiro, pois o mesmo funciona como uma pequena caixa d'água. No momento em que abrimos a água através da torneira, a pressão dentro da caixa de água do chuveiro aumenta, fazendo com que um diafragma no interior do chuveiro se eleve e feche os contatos elétricos do chuveiro conectando os fios de energia (110V ou 220V) diretamente naquela resistência mergulhada na água. Com a resistência ligada na energia elétrica, a mesma começa a aquecer, e conseqüentemente aquecer a água que agora está passando por ela rapidamente e caindo sobre o assado banhista. Ao fechar a torneira, a pressão dentro do chuveiro diminui e o mecanismo desliga os fios elétricos da resistência, e ao mesmo tempo a água deixa de cair, porém, uma porção sempre fica armazenada dentro do chuveiro. OBS: As posições Inverno e Verão dos chuveiros, simplesmente modificam as conexões dos fios de energia para usarem a resistência total ou apenas uma parte da resistência mergulhada na água. Com isso temos duas temperaturas

distintas nos chuveiros tradicionais. Um controle mais fino se consegue diretamente na torneira controlando a vazão de água.

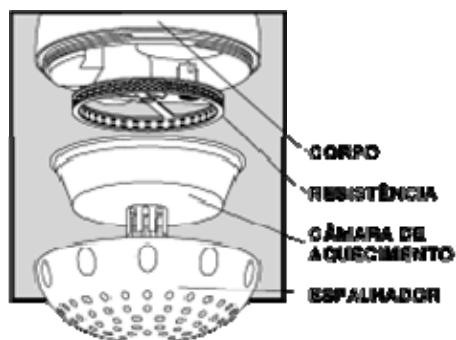


Figura 1: Desenho ilustrativo do chuveiro elétrico convencional

Considerando a resistência elétrica como agente no aquecimento da água encontramos outros equipamentos que fazem um controle de temperatura.

Um equipamento muito utilizado nos chuveiros elétricos para controlar a temperatura está diretamente ligado à resistência, isto é, o usuário regula o valor da resistência através de um potenciômetro proporcionando assim uma regulação que não depende da vazão da água mas sim da quantidade de calor gerado pela resistência.

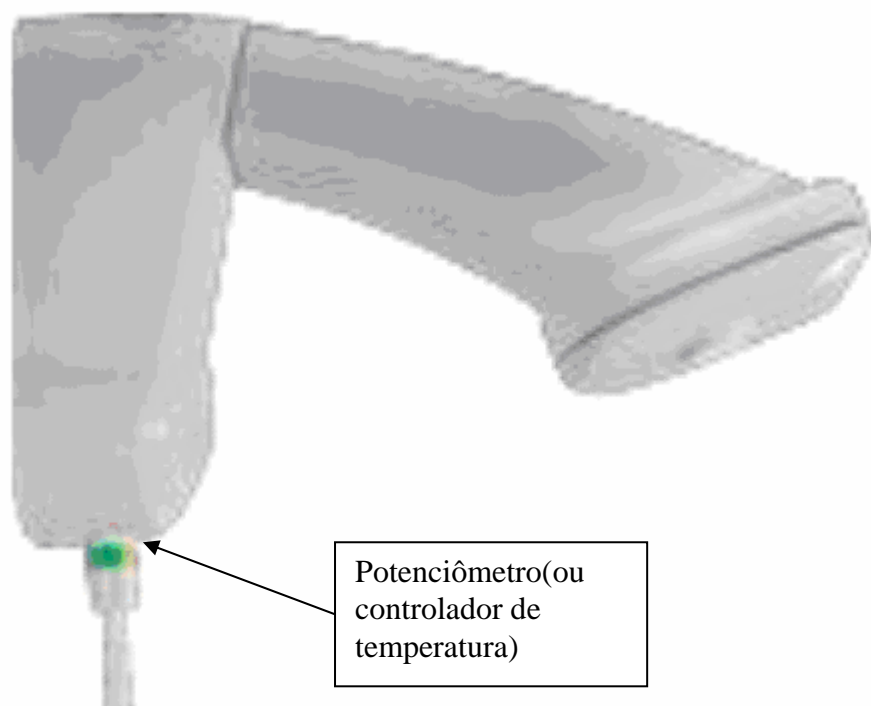


Figura 2: Chuveiro elétrico com controlador de temperatura manual

## 1.2 Aquecimento da água a chama

No segundo grupo encontram-se os equipamentos chamados aquecedores a gás. Os aquecedores de passagem são os usados mais largamente nas residências. No aquecedor a gás, há duas tubulações independentes: uma por onde circula a água, e outra por onde passa o gás. Quando se abre a torneira de água quente, a água faz funcionar um pequeno dispositivo situado abaixo do piloto, o que provoca a abertura de uma válvula, que liberta o gás. Quando isto ocorre, acendem-se vários viços de gás simultaneamente, e a água, que está circulando pela serpentina,

começa a ser aquecida. Na parte superior do aparelho, há uma chaminé, por onde são expulsos os resíduos de gás que não foram queimados.

Esse sistema basicamente formado por uma câmara de combustão formada por queimadores e também por uma serpentina por onde passa a água que se quer aquecer. Existem aquecedores que controlam a temperatura da água controlando, a chama, isto é controlando a vazão de gás fornecida para combustão.

No Brasil, existem dois tipos:

>> Aquecedor de Potência Modulante: Durante o funcionamento a vazão de gás mantém-se constante, e por isso, se variar o consumo de água, a temperatura desta varia de forma inversa. Porém, a vazão de água e gás pode ser regulada de acordo com a vontade do utilizador, ou seja, são aquecedores modulantes.

>> Aquecedor de Potência Automodulante: este tipo de aquecedor varia automaticamente a sua potência de modo a manter constante a temperatura de saída da água.

Ambos são subdivididos em três tipos de acendimento:

### 1.2.1 Acendimento Manual

A principal característica dos aquecedores de acendimento manual é a existência de uma chama piloto permanente que serve para acender o queimador principal, logo após a entrada de água no aquecedor;

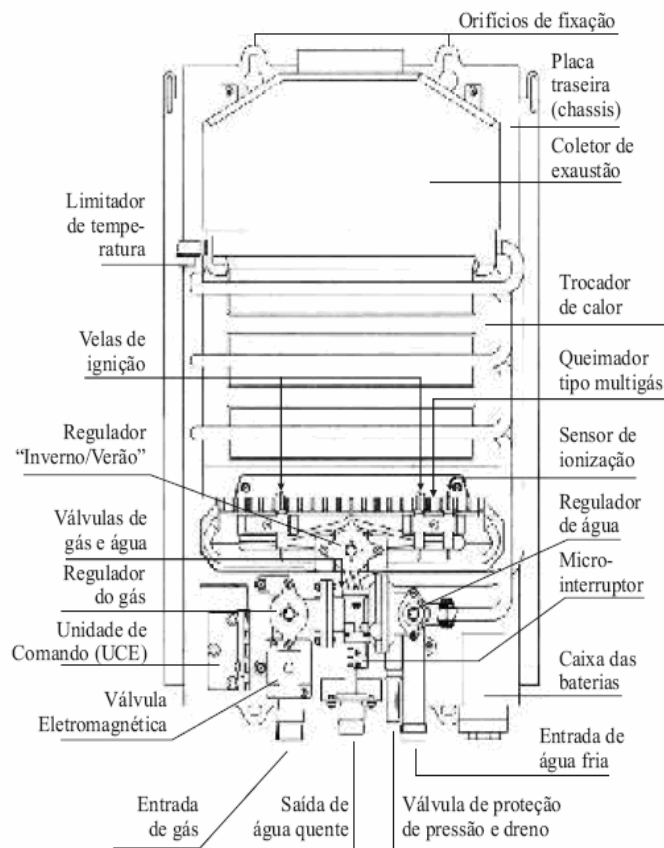
### 1.2.2 Acendimento Automático

Aquecedores equipados com ignição eletrônica (alimentada por baterias). Sempre que abrir uma torneira de água quente dar-se-á, de forma automática, a ignição do aparelho sem a necessidade de uma chama piloto.

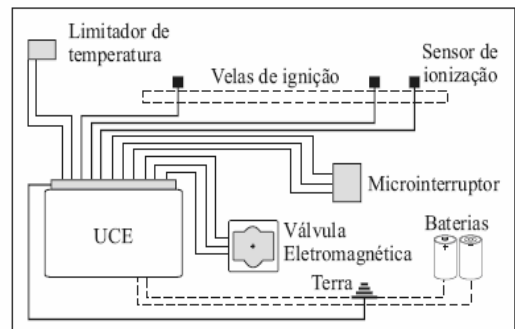
### 1.2.3 Acendimento Eletrônico

Aquecedores equipados com ignição eletrônica, porém através da energia elétrica (220v - 60Hz). Isto ocorre porque estes aquecedores detêm Exaustão Forçada ou Fluxo Balanceado, necessitando de uma corrente e amperagem maior para funcionamento da ventoinha de exaustão. Nos modelos de fluxo balanceado há também visor LCD com auto-diagnóstico.

## VISTA INTERNA



## ESQUEMA ELÉTRICO



## MATERIAIS DOS COMPONENTES DE ALTA TECNOLOGIA

Válvula Automática de Água: *Latão*  
Válvula Automática de Gás: *Alumínio*  
Queimadores: *Alumínio e Aço Inox*  
Câmara de Combustão: *Cobre e Estanho*  
Trocador de Calor: *Cobre e Estanho*  
Coletor de Exaustão e Defletores: *Alumínio*  
Eletroeletrônicos: *Alumínio, Cobre e Plástico ABS*  
Fabricação: *P.R.C.*

Figura 3: Aquecedor de água à chama com controlador de temperatura eletrônico

### 1.3 Outras formas de controle

Existem também controladores de temperatura que independem do tipo de aquecimento da água e um exemplo desse tipo é o controlador de temperatura “power control”. Esse controlador necessita apenas que o usuário tenha disponível uma entrada de água quente e uma de água fria independentes. As duas entradas entram no equipamento e este controla a entrada de água quente ou fria para manter a temperatura sempre estável e de acordo com a que o usuário escolheu. Tal controle é efetuado pela ação de uma válvula que está mostrada abaixo. O parafuso

localizado na parte superior do equipamento regula a temperatura desejada. O que determina a vazão de água quente ou fria que vai para a mistura é um atuador que é feito com um material especial muito suscetível a mudança de temperatura e que expande ou retrai dependendo da temperatura de mistura e assim abre ou fecha a saída de água quente e fria.

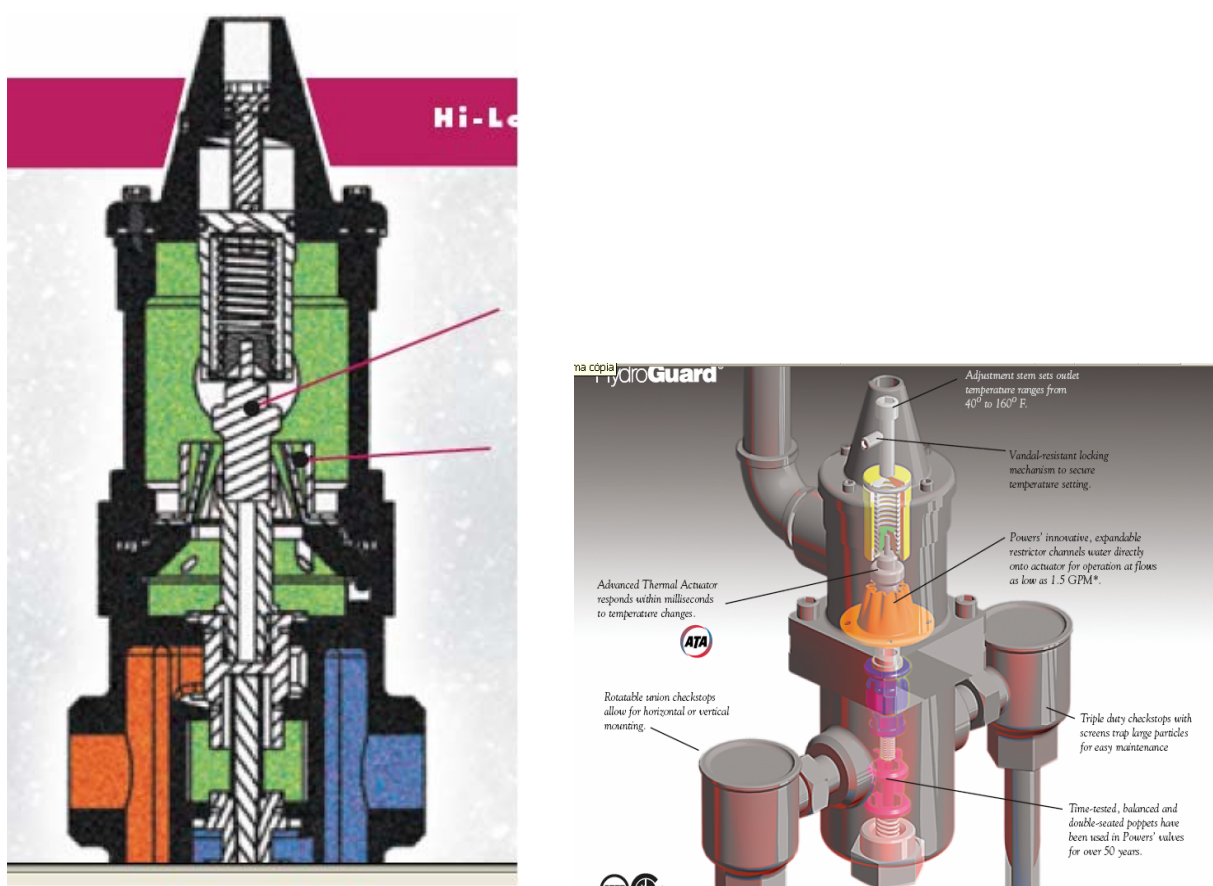


Figura 4: Vista em corte de válvula controladora de temperatura

#### 1.4 Característica da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2 faz-se uma revisão sobre as técnicas do controlador PID, bem como sobre os tópicos teóricos. Além disso há um

detalhamento do funcionamento dos termopares. O Capítulo 3 descreve em detalhes o desenvolvimento da metodologia proposta. No Capítulo 4 relatam-se os resultados obtidos. E, finalmente, o Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.



## 2. Formulação teórica

### 2.1 PID

O presente texto pretende, inicialmente, dar a conhecer quais as características principais das várias ações de controle, constitutivas, de um P.I.D., e em seguida apresentar a utilização no experimento.

Nos métodos práticos de sintonia o primeiro passo na utilização dos controladores standard P, PI, PD, PID tem como principal decisão a escolha dos modos a utilizar (proporcional, derivativo, integral, ou uma combinação destes). Uma vez tomada essa decisão, procede-se o ajuste dos vários parâmetros do controlador. O ajuste ou calibração do controlador (sintonização de controladores) consiste em deduzir, partindo da resposta do sistema, quando este é sujeito a entradas específicas, determinando valores que vão permitir o cálculo dos referidos parâmetros.

A vantagem deste procedimento é não existir necessidade de conhecer o modelo do sistema (por vezes muito difícil de determinar). Neste projeto, por exemplo, não foi feita nenhuma modelagem de fluidos, apesar de tratarmos diretamente com esses sistemas. Pode-se assim concluir que se deverá recorrer a este procedimento somente quando o custo de calibração do controlador for inferior ao custo associado à análise do sistema e projeto do controlador adequado.

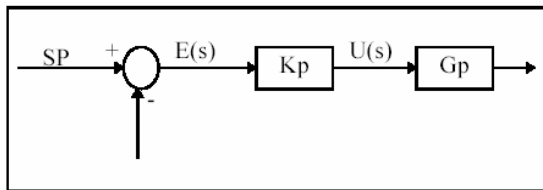
O método analítico consiste em sintonizar os modos PID para uma aplicação específica de modo a que determinados critérios de “performance” sejam verificados. Este é usado sempre que a função de transferência do sistema é conhecida 2.

Finalmente, é importante realçar que não é obrigatório que se utilize apenas um destes métodos, na medida em que, na maior parte das vezes, os projetos resultam da sua combinação.

Antes de proceder à apresentação propriamente dita dos dois procedimentos referidos anteriormente, será conveniente analisar algumas das ações básicas de controlo utilizadas na industria e a sua contribuição para a resposta de um sistema.

### 2.1.1 Ação Proporcional

Neste tipo de controlador a relação entre a sua saída e o sinal de erro,  $e(t)$ , é dada por:



$$u(t) = K_p e(t) \xrightarrow{L} U(s) = K_p E(s) \quad (1)$$

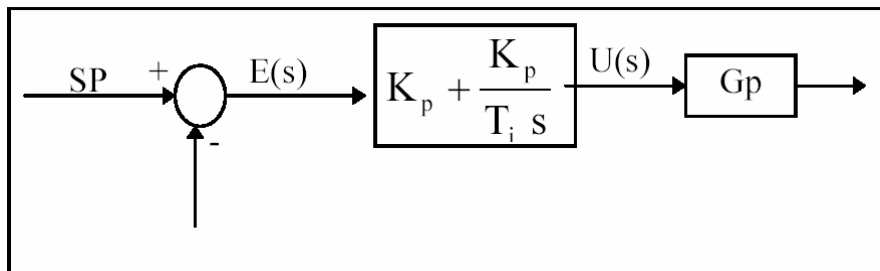
em que  $K_p$  é designado por ganho proporcional.

Um controlador proporcional consiste essencialmente num amplificador com ganho ajustável. Uma característica importante desta ação de controlo, é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorre uma alteração de carga <sup>3</sup>, e o sistema que se pretende controlar seja do tipo 0. O erro estacionário que é dependente de  $K_p$  e da carga, pode ser minimizado por um aumento de  $K_p$ . No entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabelecimento e eventualmente até à instabilidade.

Conclui-se assim que este tipo de controlador só pode ser usado, quando o ganho proporcional é suficientemente elevado para reduzir o erro estacionário a um nível aceitável, ou quando não são previsíveis alterações frequentes da carga.

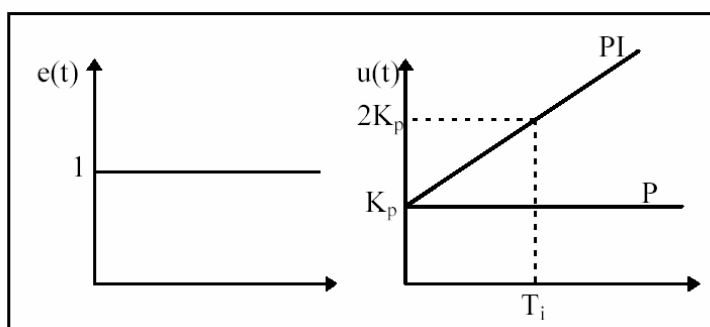
## 2.1.2 Ação Proporcional - Integral

Se considerarmos que a saída do controlador é agora função do erro e do integral do erro, estamos perante um controlador proporcional-integral:



$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \xrightarrow{L} U(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (2)$$

em que  $T_i$  (tempo integral), é o tempo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional, e é expresso em segundos ou minutos.



A componente integral, ao adicionar um pólo na origem da função de transferência do controlador, elimina o erro estacionário de posição, independentemente do sistema que se pretende controlar. Se, por um lado, como já referido anteriormente, a ação integral elimina o

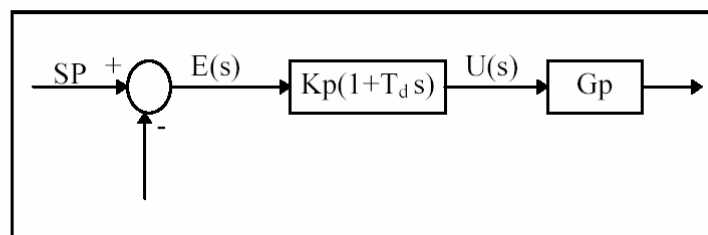
erro estacionário, por outro, aumenta o tempo de estabelecimento e piora a estabilidade relativa, o que usualmente é indesejável.

Como consequência, o ganho da ação proporcional deve ser reduzido, sempre que esta esteja combinada com a ação integral.

O PI é utilizado em sistemas com freqüentes alterações de carga, sempre que o controlador P, por si só, não seja capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitável. Contudo o sistema deve ter alterações de carga relativamente lentas, para evitar oscilações induzidas pela ação integral.

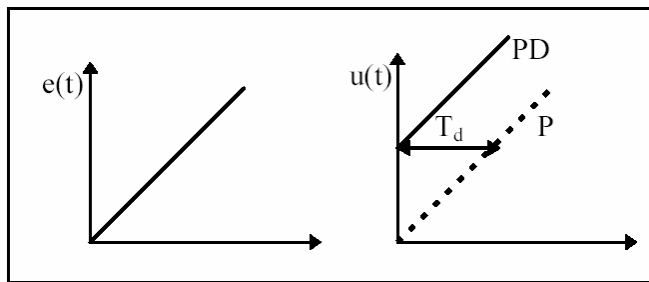
### 2.1.3 Ação Proporcional – Derivativa

Neste controlador o sinal de controle ( $u(t)$ ) é proporcional ao erro e à sua taxa de variação:



$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \xrightarrow{L} U(s) = K_p (1 + T_d s) \quad (3)$$

em que  $T_d$  (tempo derivativo), o período de tempo antecipado pela ação derivativa relativamente à ação proporcional, é expresso em segundos ou minutos.

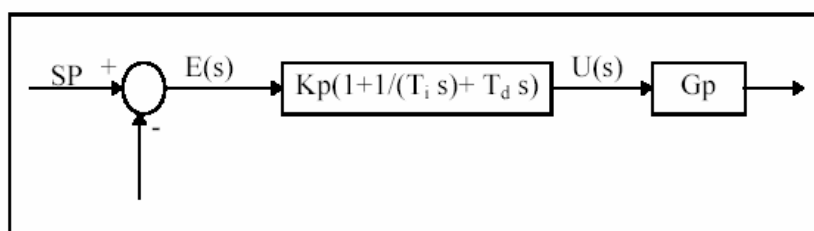


O fato de o sinal de controlo ser proporcional à taxa de variação do erro, implica que o modo derivativo nunca possa ser usado sozinho, uma vez que só responde a regimes transientes.

A adição do modo derivativo ao modo proporcional resulta num controlador altamente sensível, uma vez que aquele primeiro, ao responder a uma taxa de variação do erro, permite correções antes deste ser elevado. Não obstante, o modo derivativo não afeta diretamente o erro estacionário, adiciona amortecimento ao sistema (melhora a estabilidade) e assim permite o uso de valores de  $K_p$  mais elevados, o que implica um menor erro estacionário. Um inconveniente deste modo é o de acentuar o ruído de alta frequência.

#### 2.1.4 Ação Proporcional - Integral – Derivativa

Este modo resulta da combinação dos modos proporcional, integral e derivativo. Pode-se afirmar que resulta num compromisso entre as vantagens e desvantagens de um PI e as vantagens de um PD. A saída do controlador é dada por:



$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \xrightarrow{L} U(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) E(s) \quad (4)$$

Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que conduz a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI.

No entanto, estas propriedades assumem um caráter geral, pois podem existir exceções em determinados sistemas.

Geralmente, para uma função de transferência em cadeia aberta com a seguinte forma:

$$\frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

um  $K_p$  elevado tem o efeito de reduzir o tempo de subida e o erro estacionário (sem nunca o eliminar). O controle integral terá como efeitos, por um lado, eliminar o erro estacionário e por outro piorar a resposta transitória, isto é, torná-la mais oscilatória. Sempre que se utilize controlo integral, deve-se sempre testar inicialmente com um  $K_p$  reduzido. A utilização do controle derivativo tem como principal consequência uma melhoria da estabilidade do sistema, reduzindo a sobrelevação e melhorando a resposta transitória.

Resposta CF	Tempo de Subida	Sobreelevação	Tempo de Estabelecimento	Erro Estacionário
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem alteração	Diminuição	Diminuição	Sem alteração

Tabela 1: Efeitos na resposta, do sistema em cadeia fechada, de adicionar os modos proporcional, integral e derivativo.

Note que estas correlações não são exatas, uma vez que, se forem alterados um dos parâmetros do controlador pode-se estar a alterar o efeito das outras ações. Por esta razão, a tabela só deve ser usada como referência quando se está a determinar os parâmetros do controlador.

Quanto à decisão do tipo de controlador a usar numa determinada aplicação, não é possível obter uma resposta definitiva. Idealmente, o controlador mais simples que satisfaça a “resposta desejada” é o que deve ser escolhido, infelizmente esta é uma escolha que geralmente só se pode fazer quando a aplicação é simples ou quando existe alguma informação relativa a aplicações semelhantes.

A seleção do controlador deve depender das condições operativas do sistema e de especificações de performance tais como, o erro estacionário máximo, a sobrelevação máxima e tempo de estabelecimento permitido. Se o erro estacionário não é tolerado, então o modo integral deve ser incluído no controlador, uma vez que esta é a única ação que o permite eliminar ou reduzir. A necessidade da ação derivativa pode ser ditada por uma sobrelevação máxima e/ou tempo de estabelecimento. Se um reduzido erro estacionário não é crítico para as condições operativas do sistema, então é possível omitir o modo integral, e o uso do modo derivativo depende entre outros fatores da necessidade ou não de adicionar ganho suplementar ao modo proporcional.

Como regra geral, pode-se afirmar que se adiciona o modo proporcional para obter um determinado tempo de subida, que se adiciona o modo derivativo para obter uma determinada sobrelevação e que o modo integral só deve ser introduzido para eliminar o erro estacionário.

A questão que se coloca agora é como seleccionar os parâmetros dos controladores de modo a podermos obter uma resposta “satisfatória”, quando se controla um determinado sistema, perante um quase completo desconhecimento da sua dinâmica (1º Procedimento). Assim, torna-se necessário recorrer a métodos empíricos para resolver este problema.

## 2.2 Termopar

Os termopares são dispositivos eletrónicos com larga aplicação para medição de temperatura. São baratos, podem medir uma vasta gama de temperaturas e podem ser substituídos sem introduzir erros relevantes.

Em 1822, o físico Thomas Seebeck descobriu (acidentalmente) que a junção de dois metais gera uma tensão eléctrica que é função da temperatura. O funcionamento dos termopares é baseado neste fenómeno, que é conhecido como Efeito de Seebeck. Embora praticamente se possa construir um termopar com qualquer combinação de dois metais, utilizam-se apenas algumas combinações normalizadas, isto porque possuem tensões de saída previsíveis e suportam grandes gamas de temperaturas.

Existem tabelas normalizadas que indicam a tensão produzida por cada tipo de termopar para todos os valores de temperatura que suporta, por exemplo, o termopar tipo K, utilizado neste experimento, com uma temperatura de 300 °C irá produzir 12,2 mV. Contudo, não basta ligar um voltímetro ao termopar e registar o valor da tensão produzida, uma vez que ao ligarmos o voltímetro estamos a criar uma segunda (e indesejada) junção no termopar. Para se fazerem medições exatas devemos compensar este efeito, o que é feito recorrendo a uma técnica conhecida por compensação por junção fria.



Caso se esteja a interrogar porque é que ligando um voltímetro a um termopar não se geram várias junções adicionais (ligações ao termopar, ligações ao aparelho de medida, ligações dentro do próprio aparelho, etc...), a resposta advém da lei conhecida como lei dos metais intermédios, que afirma que ao inserirmos um terceiro metal entre os dois metais de uma junção de um termopar, basta que as duas novas junções criadas com a inserção do terceiro metal estejam à mesma temperatura para que não se manifeste qualquer modificação na saída do termopar. Esta lei é também importante na própria construção das junções do termopar, uma vez que assim se garante que ao soldar os dois metais a solda não irá afectar a medição. Contudo, na prática as junções dos termopares podem ser construídas soldando os materiais ou por aperto dos mesmos.

Todas as tabelas normalizadas dão os valores da tensão de saída do termopar considerando que a segunda junção do termopar (a junção fria) é mantida a exatamente zero graus Celsius. Antigamente isto conseguia-se conservando a junção em gelo fundente (daqui o termo compensação por junção fria). Contudo a manutenção do gelo nas condições necessárias não era fácil, logo optou-se por medir a temperatura da junção fria e compensar a diferença para os zero graus Celsius.

Tipicamente a temperatura da junção fria é medida por um termístor de precisão. A leitura desta segunda temperatura, em conjunto com a leitura do valor da tensão do próprio termopar é utilizada para o cálculo da temperatura verificada na extremidade do termopar. Em aplicações menos exigentes, a compensação da junção fria é feita por um semiconductor sensor de temperatura, combinando o sinal do semiconductor com o do termopar.

É importante a compreensão da compensação por junção fria; qualquer erro na medição da temperatura da junção fria irá ocasionar igualmente erros na medição da temperatura da extremidade do termopar.

#### Tipo K (*Cromel / Alumel*)

O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido à sua popularidade estão disponíveis variadas sondas. Cobrem temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

### 3. Desenvolvimento

#### 3.1 Montagem de protótipo

Na primeira parte do projeto foi necessário montar um sistema que simulasse sua utilização real, tornando possível alterar a temperatura de saída da água e ao mesmo tempo monitorá-la.

Para isso, foi montado um sistema com os seguintes equipamentos:

- Caixa d'água;
- Tubulação de PVC de ½" de diâmetro;
- Mangueira de ½" de diâmetro;
- Aquecedor elétrico de 4,6 kWatts de potência e 127 Volts;
- Válvula gaveta;
- Motor Pittman 12V DC;
- Termopar tipo K;
- Multímetro para ler temperatura final de mistura da água;
- Bomba d'água Dancor CP-41/4 cv.

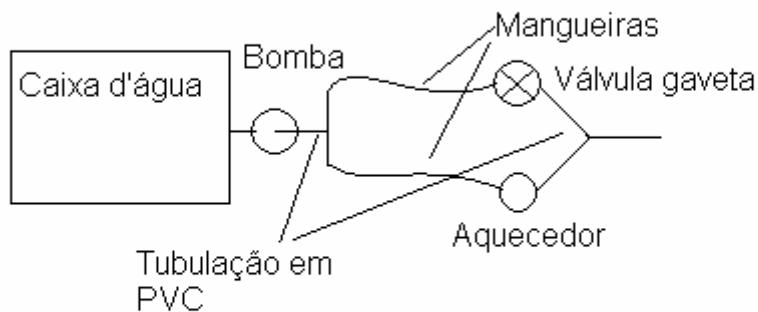


Figura 5: Diagrama esquemático do sistema hidráulico

O esquema funciona da seguinte forma: a água que está contida na caixa d'água passa pela bomba e é distribuída para todo o sistema. Logo após a saída da bomba há um Tee que divide o fluxo de água, sendo parte destinada a um aquecedor, que irá esquentá-la e gerará um fluxo com vazão constante de água quente. O restante irá passar por uma válvula que, dependendo de sua abertura, ou seja, aumentando ou diminuindo a vazão de água “fria”, irá resfriar ou esquentar a mistura final, respectivamente.

Para medir essa temperatura final da mistura será utilizado um termopar localizado na saída do tubo. É importante que a temperatura só seja medida após uma pequena distância do ponto de mistura para que esta fique mais homogênea.

### 3.2 Medição de temperatura

Após garantir o funcionamento do sistema foi necessário medirmos as temperaturas máxima e mínima, ou seja, deixar a água escoar com a válvula gaveta totalmente fechada e depois totalmente aberta, respectivamente. A temperatura foi medida na saída do sistema utilizando um termopar tipo K.

Temperatura mínima = 29,7°C

Temperatura máxima = 35,4°C

É importante ressaltar as condições climáticas no local e na hora da medição das temperaturas, pois isso pode influenciar na temperatura da água “fria”, ou seja, caso a temperatura da caixa d’água sofra uma variação, isso irá alterar também nossa temperatura máxima e mínima.

Temperatura ambiente = 31°C.

Para que fosse possível simular o controle da temperatura da água, foi necessário traçar um gráfico relacionando o ângulo de abertura da válvula com a variação da temperatura final da água. Considerando que após uma volta completa de sua haste seu obturador passa da posição fechada para totalmente aberta, foram marcados 6 pontos:

1. A válvula toda fechada,
2. 45°,
3. 90°,
4. 180°,

5. 270°,
6. E por último 360°, ou seja, a válvula toda aberta.

Ângulo de abertura da válvula	Temperatura (°C)
0	35,4
45	31,1
90	30,3
180	29,8
270	29,7
360	29,7

Tabela 2: Ângulo de abertura da válvula x temperatura

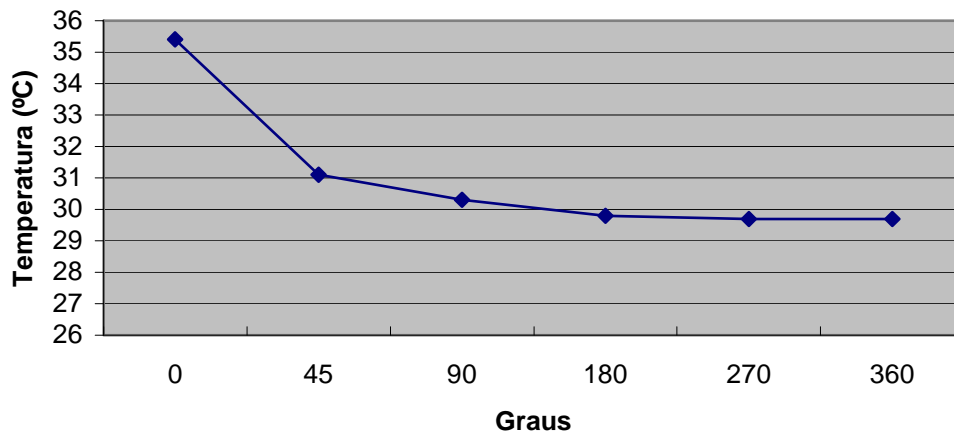


Gráfico do ângulo da válvula x temperatura

Feitas essas medições, foi necessário quantificar o atraso no sistema. Para isso foi utilizado o seguinte procedimento: a válvula foi totalmente aberta até estabilizar na temperatura mínima previamente encontrada. Então, foi subitamente fechada e, com isso, medido o tempo para estabilizar na temperatura máxima.

Foi reparado durante o experimento que a água demora aproximadamente 1 segundo para chegar numa temperatura acima da máxima medida anteriormente, aproximadamente 39°C, e em seguida começa a decair até estabilizar em 35,4°C. O tempo total até estabilizar na temperatura máxima foi de 17"09.

### 3.3 Utilização do termopar

O princípio dos termopares descoberto por Johan Seebeck em 1821. Na ocasião mostrou que quando a junção de dois materiais diferentes, formando um circuito fechado, é exposta a temperaturas diferentes, uma força eletromotriz é gerada induzindo uma corrente elétrica.

Os termopares comumente utilizados são identificados por letras, de acordo com a Instrument Society of América (ISA). Nessa experiência foi utilizado o termopar tipo K, o qual possui a seguinte composição:

- Níquel – 10% cromo (+) / Níquel – 5% alumínio (-)

Essa força eletromotriz gerada pelo termopar, também chamada voltagem ou tensão é medida em microvolts. Foi detectada então a necessidade de amplificar esse sinal para que fosse possível comparar com uma outra tensão que seria pré-estabelecida no sistema. O sinal deve ser medido entre 0 e 10 volts.

Foi feito um circuito elétrico para transformar os sinais, que são gerados em microvolts, para o intervalo desejado. Segue abaixo a lista dos equipamentos necessários na construção do circuito:

- Proto-board;
- Fonte de tensão variável entre 0 e 15 volts;
- 11 Resistências: 02 de 10k $\Omega$ , 01 de 10 $\Omega$ , 01 de 700 $\Omega$ , 01 de 2k4 $\Omega$ , 02 de 2k2 $\Omega$ , 02 de 536 $\Omega$ , 01 de 47k $\Omega$  e 1 de 4k7 $\Omega$ ;
- 01 transistor tipo 2N2222;
- 2 Trimpots: 01 de 500 $\Omega$  e 01 de 50 $\Omega$ .

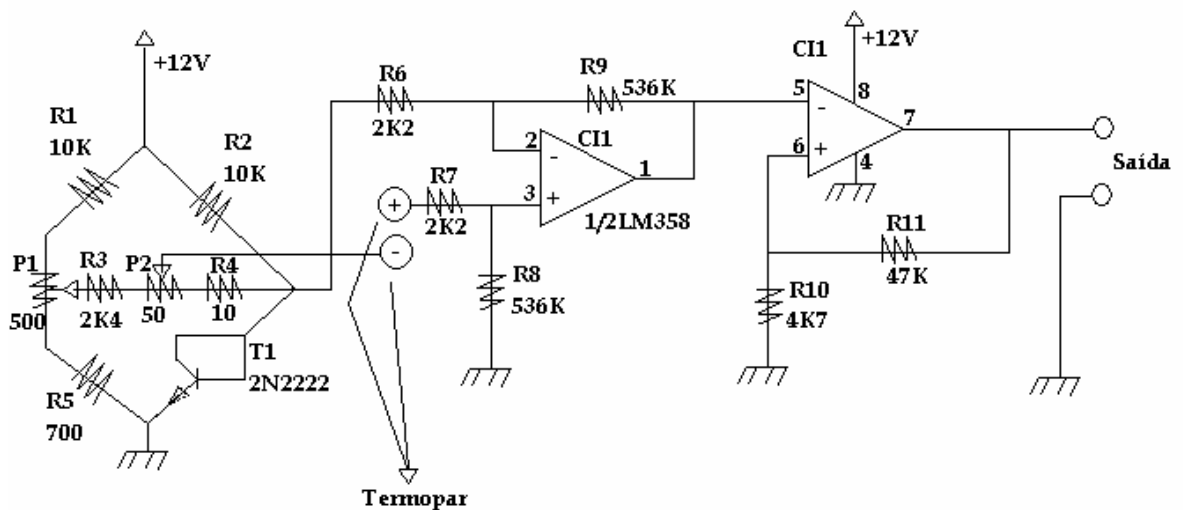


Figura 6: Circuito elétrico utilizado para amplificar o sinal do termopar.

Após montar o circuito foi necessário calibrar a ponte de Wheatstone.

De acordo com a literatura, deve-se conectar o negativo do voltímetro na saída da resistência R4 e o positivo no Trimpot P1. Feito isso é necessário que se obtenha a temperatura ambiente. Para cada grau Celsius da temperatura ambiente, deverá ser ajustado 2 microvolts na



leitura do voltímetro. Por exemplo: durante a calibração a temperatura ambiente estava marcando 25°C, o P1 foi então ajustado até que indicasse no voltímetro 50 microvolts. A calibração da Ponte de Wheatstone está finalizada.

No próximo passo foi necessário ajustar os ganhos do circuito, para que na saída indicasse uma voltagem entre 0 e 10 Volts, como fora previsto. Nesse procedimento o negativo do voltímetro foi ligado no Trimpot P2 e o positivo na saída do circuito, no ponto 7 ilustrado na figura 6. Os ganhos foram então ajustados para que a voltagem indicada fosse 1/10 da temperatura real, ou seja, caso fosse medido algo na temperatura de 30°C, a leitura no voltímetro seria de 3.0 Volts. Para fazer esses ajustes, foi necessário alterarmos as resistências R9 e R11, além de ajustes finos no Trimpot P2. O circuito agora está calibrado e pronto para ser utilizado já com os ganhos necessários.

### 3.4 Controle PID

Nesta etapa do projeto o objetivo foi criar um controlador que captasse a informação gerada pelo termopar em Volts e, após comparar com a voltagem determinada pelo usuário, devolveria uma outra voltagem que indicaria se seria necessário abrir, caso a mistura estivesse mais quente que o desejado, ou fechar a válvula, caso contrário.

Decidiu-se que a melhor opção seria um controlador PID, o qual é bastante difundido na indústria de modo geral. O seu nome é uma abreviatura referente às primeiras letras das palavras proporcional, integral e diferencial, respectivamente. O significado destas palavras está assim relacionado: proporcional a um erro, proporcional à integral no tempo deste erro e proporcional à derivada no tempo deste erro.

A equação fundamental do controlador PID pode ser escrita da seguinte forma:

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (6)$$

Pela simples inspeção da equação acima, percebe-se que a primeira parcela do lado direito da mesma está relacionada com o controle proporcional, a segunda com o integral e a terceira com o diferencial.

Foi projetado no software *LabView*, um programa que faria todo o controle do experimento através do controlador PID. O programa segue no apêndice 1 com maiores explicações sobre seu funcionamento.

Resumidamente as atribuições do programa seriam de receber a voltagem, já amplificada, do termopar, passar pelo controlador PID, que compararia essa voltagem com outra determinada pelo usuário do programa, e, dependendo do erro gerado enviaria uma voltagem para o Roboteq.

Apesar de termos a disponibilidade das três ações básicas, nesta aplicação não será necessária a utilização de uma ou mais destas ações. Por exemplo, em uma planta do tipo 1 (i.e. apresentando um pólo na origem) a utilização da ação integral não se fará necessária se o objetivo de controle for o de seguir, com erro nulo, um sinal de referência constante, que é o caso deste projeto. Basicamente temos 4 configurações possíveis de controladores a partir de uma estrutura PID:

1. proporcional (P)
2. proporcional-integral (PI)
3. proporcional-derivativo (PD)

#### 4. proporcional-integral-derivativo (PID)

Nesse caso foi utilizada a primeira configuração, o controlador proporcional.

A determinação manual dos parâmetros de controle PID foi uma tarefa árdua e dispendiosa pela forte interação existente entre estes parâmetros. Foi constatado que ao alterar qualquer parâmetro, por menos que fosse essa alteração, gerava grande perturbação em todo o sistema.

Percebeu-se então, baseado tanto na literatura, como em conselhos dados de empresas experientes no assunto e também em constatação experimental, que o sistema teria um melhor funcionamento se não fosse alterado seu  $K_i$  e  $K_d$ , monitorando apenas seu  $K_p$ , de acordo com a necessidade.

Muitas vezes, processos simples podem ser controlados satisfatoriamente apenas com a ação proporcional. Neste caso as ações integral e derivativa são simplesmente desligadas. Tem-se então:

$$u(t) = K(e(t)) \quad (7)$$

Tentou-se então encontrar o menor  $K_p$  possível que permitiria ao motor mover a válvula, superando a inércia do sistema. Seu valor foi encontrado experimentalmente e no fim determinou-se:

$$K_p = 0,093$$

O critério para a escolha desse  $K_p$  foi o fato que para valores menores que esse, o motor apresentava grande dificuldade para movimentar a válvula.

### 3.5 Procedimento experimental

Este experimento possui diversas etapas, entre elas estão a captação da temperatura, sua interpretação e leitura, monitoramento da mesma e resposta do sistema para controlar a temperatura final da mistura da água, que é o verdadeiro objetivo do projeto.

Para que fosse possível realizar todas essas etapas foram necessários utilizar os seguintes equipamentos:

- Para o protótipo estão descritos no item 3.1;
- Para a leitura e amplificação do sinal do termopar estão descritos no item 3.3;
- Computador;
- Software *LabView* versão 8.0;
- Placa de saída de voltagem;
- Roboteq.

Como o objetivo deste experimento é controlar a temperatura da mistura d'água na saída do sistema, foi utilizado um termopar para monitorá-la. Um problema encontrado foi o fato de que a voltagem enviada pelos termopares é dada em microvolts, e o sistema que seria utilizado para fazer essa leitura não permitia trabalhar com tensão tão pequena.

Para resolver o problema foi necessário elaborar e construir um circuito elétrico com o propósito de amplificar essa voltagem, como fora dito no item 3.3 deste trabalho.

O circuito em questão recebia a voltagem enviada pelo termopar e amplificava para 1/10 da temperatura real, e como a temperatura no sistema não varia mais que um mínimo de 29°C e máximo de 36°C, o range de voltagem se encontrou sempre, sem maiores dificuldades, entre 0 e 5 volts, considerado um bom intervalo para trabalhar com o programa no *LabView*.

Após amplificar o sinal vindo do termopar, foi enviado diretamente para o computador que aquisitava todos os dados. Essa voltagem era então comparada com outra já determinada pelo usuário. Ao subtrair uma da outra era gerado o que resolveu chamar de “erro”. Quando este se encontrava positivo, o programa mandava para sua saída, que será lida pelo Roboteq, um sinal positivo, caso contrário seria enviado um sinal negativo.

O Roboteq tem como função no projeto receber a tensão do computador e mandar para o motor, que controla a válvula, uma informação que deverá causar sua abertura ou seu fechamento, dependendo da tensão recebida pelo Roboteq.

É importante explicitar que no programa desenvolvido foi necessário colocar uma tensão em vazio de 2,5 Volts, que serve para a calibração do Roboteq e, caso contrário, o mesmo não irá funcionar.

Para definir como o programa iria enviar a mensagem de abertura ou fechamento da válvula foi criado um parâmetro designado “erro”. Este é simplesmente a diferença da voltagem lida no termopar pela voltagem ajustada pelo usuário. Quando o erro se encontra positivo, significa que a temperatura na saída da água está maior que a desejada e, com isso, é enviada uma tensão positiva para o Roboteq que determina o abrimento da válvula com água fria, resfriando a mistura. Caso se encontre negativo, ocorre o processo inverso, fechando a válvula e diminuindo a vazão de água fria na mistura, ocasionando o aumento da temperatura final.

## 4. Resultados

Após conseguir calibrar todo o sistema seriam iniciados os testes, se não fosse um pequeno problema, não havia como transportar todo o sistema para perto do computador e nem o contrário. Resolveu-se que a forma mais fácil de viabilizar os testes seria estender dois fios de aproximadamente 15 metros saindo do amplificador e entrando no computador, e outros dois, de mesmo comprimento, saindo do Roboteq e chegando ao motor. Havia um temor de que a resistência gerada por esses fios fosse gerar uma quantidade muito grande de ruídos e acabaria atrapalhando o desempenho do sistema, porém, não houve nenhuma influência significativa.

Outro problema enfrentado foi o fato da bomba d'água não ter funcionado, obrigando realizar experiência com água saindo diretamente da torneira. Dessa forma foi possível realizar o experimento. Porém, nas primeiras medições aquisitadas pelo computador percebeu-se que a temperatura lida no termopar não estava constante, resultando em variações entre aproximadamente 1°C até 54°C em intervalos de tempo muito pequenos, na ordem de milésimos de segundos. Foi então sugerido que fosse feito um pequeno reservatório de água na saída do sistema. O problema, apesar de ter diminuído a variação da voltagem, persistiu.

Após coletar informações decidiu-se aterrar o sistema, pois é comum, em situações como esta, a tubulação servir como uma imensa antena, transmitindo assim energia para a água, que a carrega impossibilitando a leitura do termopar pelo sistema de aquisição do computador. Após o aterramento foi possível ler a temperatura do termopar e dar continuidade aos testes.

O próximo passo foi a calibração da constante proporcional ( $K_p$ ). Foi visto que quanto menor essa constante, mais estável era o programa, além do fato de que quando se estipulava um valor muito alto, a válvula se movia com uma força excessiva e que por muitas vezes resultou no travamento da válvula. Por outro lado, o  $K_p$  possui um limite mínimo, já que, caso este seja pequeno demais, o sistema não possui força suficiente para movimentar a válvula. Enfim, o  $K_p$  deve ser o menor possível, porém, grande o suficiente para vencer a inércia do sistema.

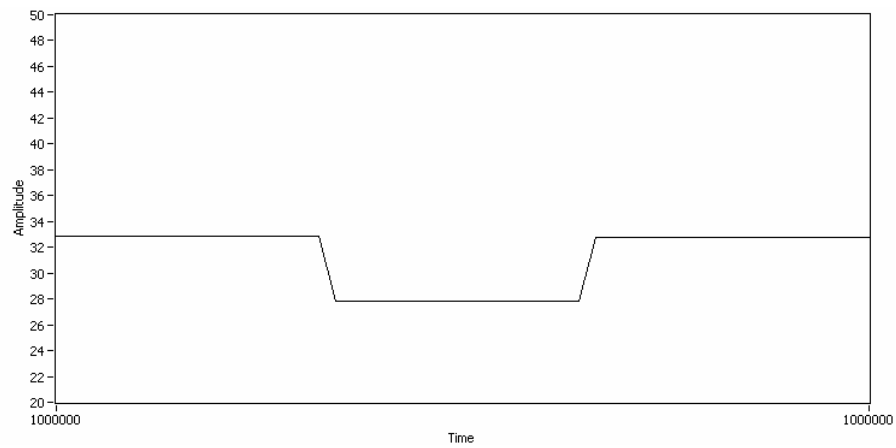
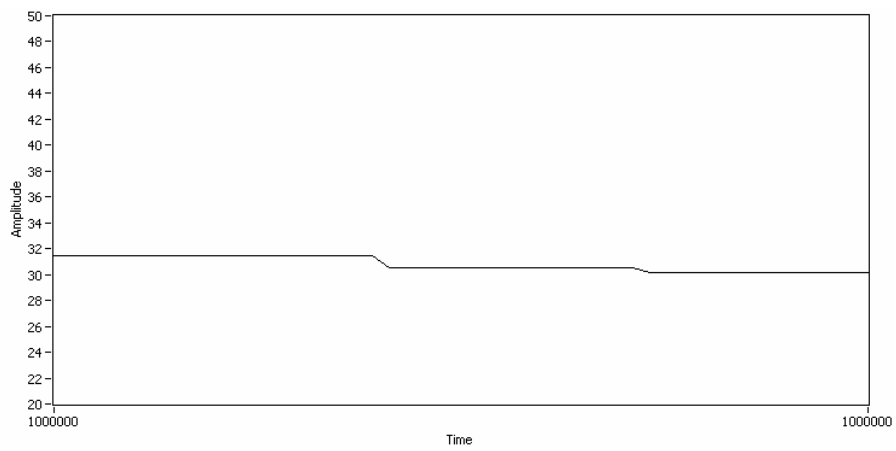
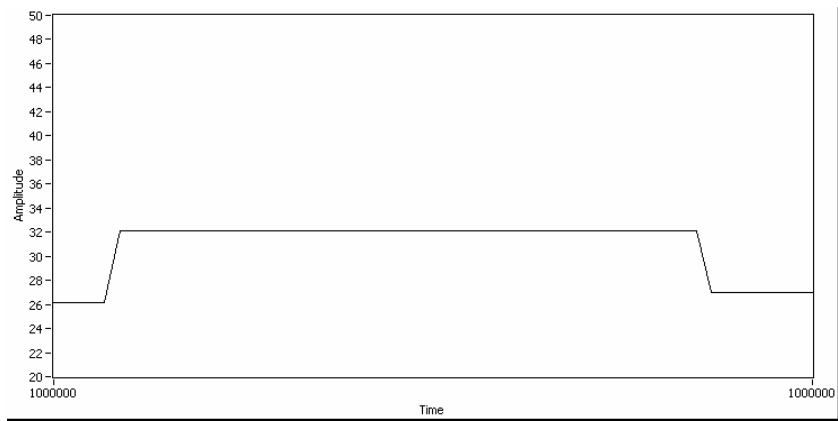
Após diversas tentativas definiu-se que a constante proporcional que obteve o melhor resultado nos experimentos foi

$$K_p = 0,093$$

Com todos os equipamentos calibrados o próximo passo seria os testes finais para comprovar o funcionamento do experimento. Porém ocorreu um problema com o aquecedor. Para solucionar o imprevisto foi adicionado na saída do sistema uma segunda mangueira para receber apenas água quente, cuja alimentação foi feita manualmente.

Após isso, os testes finais foram realizados e o funcionamento do sistema foi comprovado, fazendo com que a válvula ajustasse a temperatura de acordo com uma outra previamente ajustada no computador.

Os gráficos abaixo ilustram o sistema saindo da temperatura em que se encontrava constante e após algum tempo retorna a mesma temperatura anterior.



Gráficos ilustrando a manutenção da temperatura constante pelo sistema.



## 5. Conclusão:

Terminado a experiência foi concluído que o equipamento correspondeu as expectativas pois conseguiu controlar a temperatura mesmo com os diversos problemas que ocorreram durante o experimento.

No experimento inicial a vazão de água quente e fria era constantemente fornecida para a mistura, já que o experimento contava com uma bomba e um aquecedor comercial. No entanto esses dois equipamentos apresentaram problemas e para substituí-lo foram utilizados meios que não possuíam uma boa confiabilidade. Porém, ainda assim, o sistema de controle conseguiu manter a temperatura em uma faixa de  $\pm 2.5^\circ$ . Isso mostra a robustez do sistema, pois independente dos inputs do sistema conseguiu apresentar uma performance satisfatória.

Na experiência final a entrada de água fria estava a  $29^\circ\text{C}$  e a entrada de água quente a aproximadamente  $70^\circ\text{C}$  e, mesmo com essa significativa diferença de temperatura, o sistema conseguiu controlar a vazão de água fria para manter a temperatura que foi determinada previamente.

Outro ponto importante é que não foi necessário realizar nenhuma modelagem ou cálculos aprofundados na área de mecânica dos fluidos ou transferência de calor pois o controle conseguiu se adaptar a qualquer modificação do sistema, isto é, mesmo que a vazão ou pressão de entrada dos fluidos fosse inconstante, o controlador procurava se ajustar para manter a temperatura desejada.

Esse experimento mostra que o conceito utilizado para controlar a temperatura funciona. No experimento foram utilizados componentes que estavam disponíveis e muitas vezes esses equipamentos foram super dimensionados pois o objetivo principal era apenas comprovar esse tipo de controle poderia funcionar para qualquer situação.

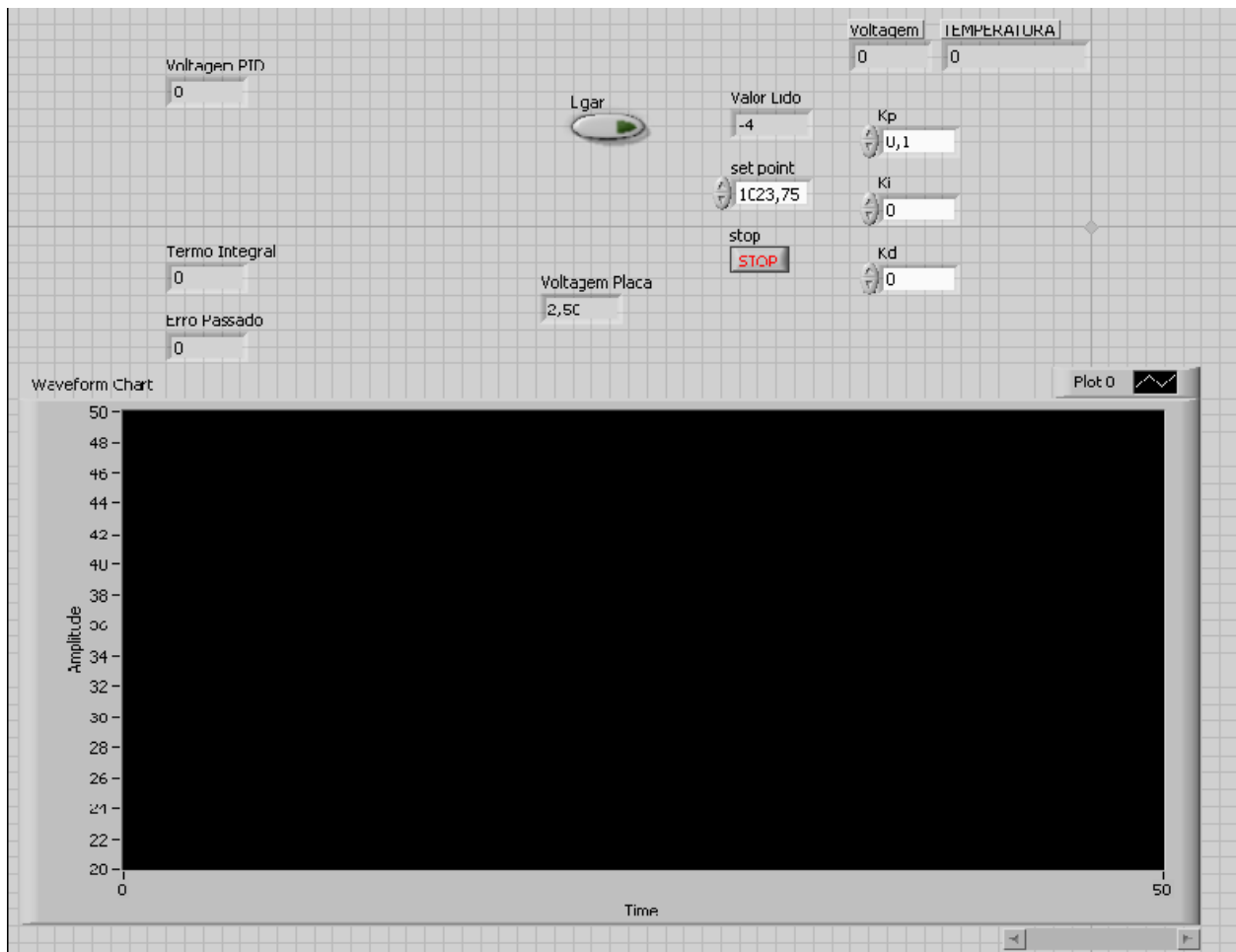
Todos os componentes utilizados no experimento podem ser substituídos por equipamentos mais baratos e menores fisicamente. O próximo passo para esse projeto seria exatamente construir o equipamento comercialmente viável pois para esse primeiro experimento custos e viabilidade de utilização não foram levados em consideração. O principal objetivo foi de testar o real funcionamento de um controlador PID no ajuste de temperatura para fluídos, o qual foi satisfatório.

## 6. Bibliografia:

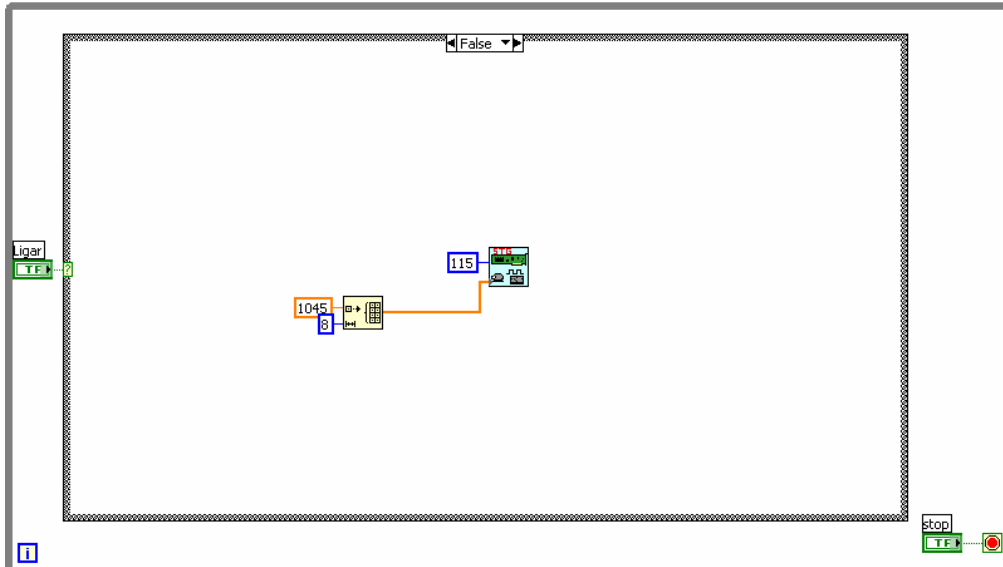
- 1 - Chemtech, A Siemens Company, Disponível em <http://www.chemtech.com.br> ,  
Acessado em 17/06/2006.
- 2 - Kuo B. C., *Sistemas de Controle Automático*, Editora Prentice-Hall do Brasil, 1982.
- 3 - Bateson, *Introduction to Control System Technology*, Macmillan Publishing  
Company, 1993
- 4 - Kuo, *Automatic Control Systems*, Prentice Hall , 1991
- 5 - Phillips and R. D. Harbor, *Feedback Control Systems*, Prentice Hall, 1991

## Apêndice 1

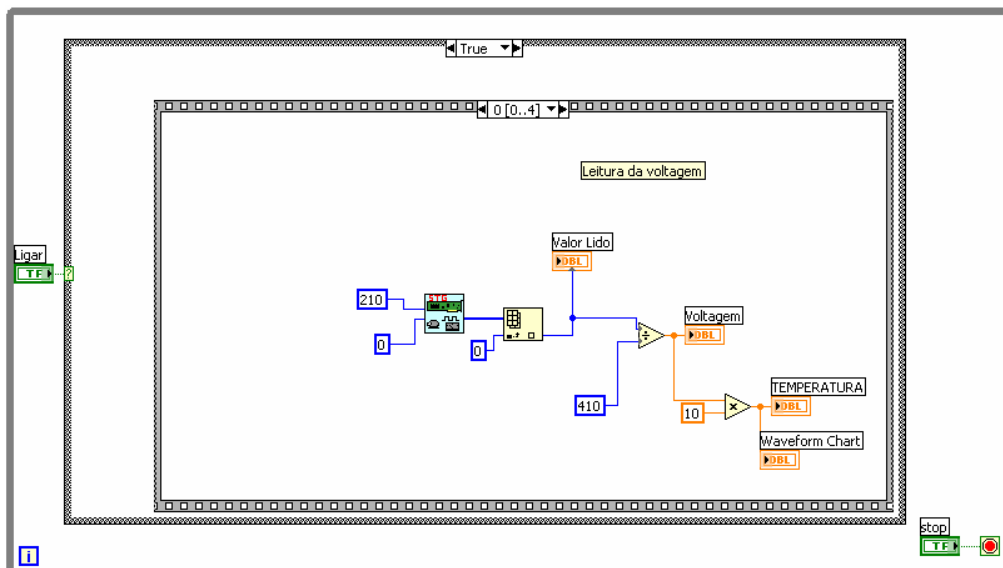
Programa PID elaborado em LabView para controlar todo o sistema. Essa é a tela onde o usuário irá trabalhar. Indica a temperatura lida pelo termopar e no “set point” será ajustada a voltagem desejada.



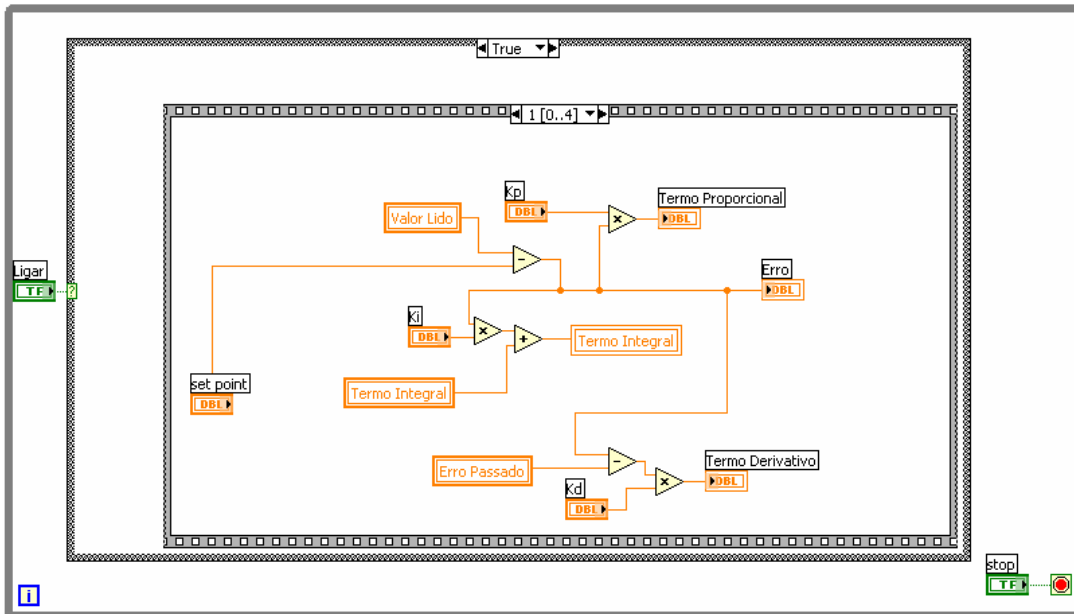
Nessa primeira parte foi criada uma tensão em vazio de 2,5 Volts para que fosse possível ligar o Roboteq.



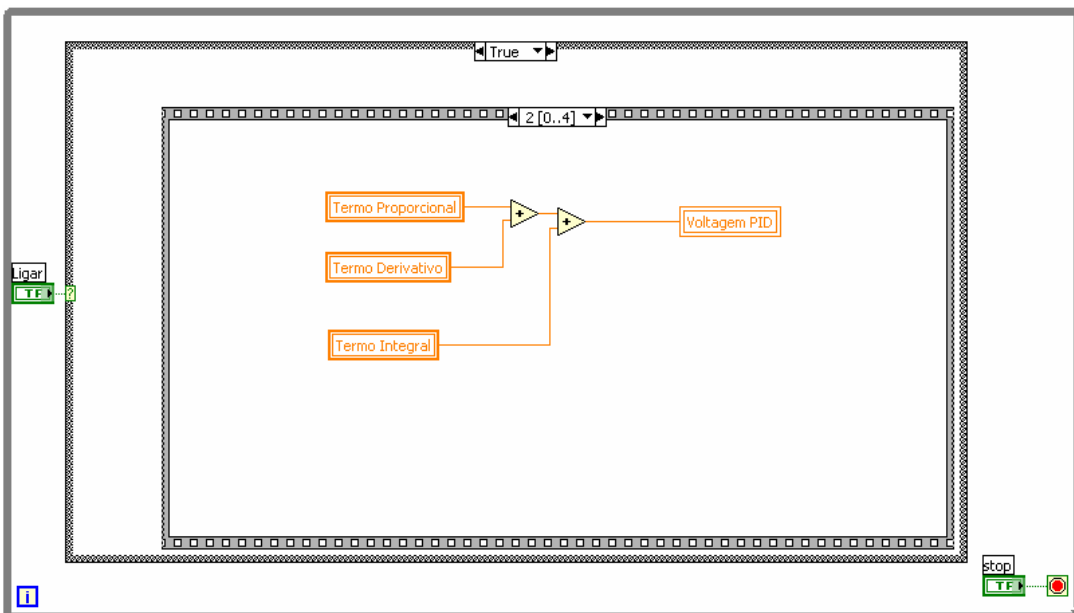
Na segunda parte o sistema recebe a informação analógica vinda do termopar e converte para uma voltagem digital.



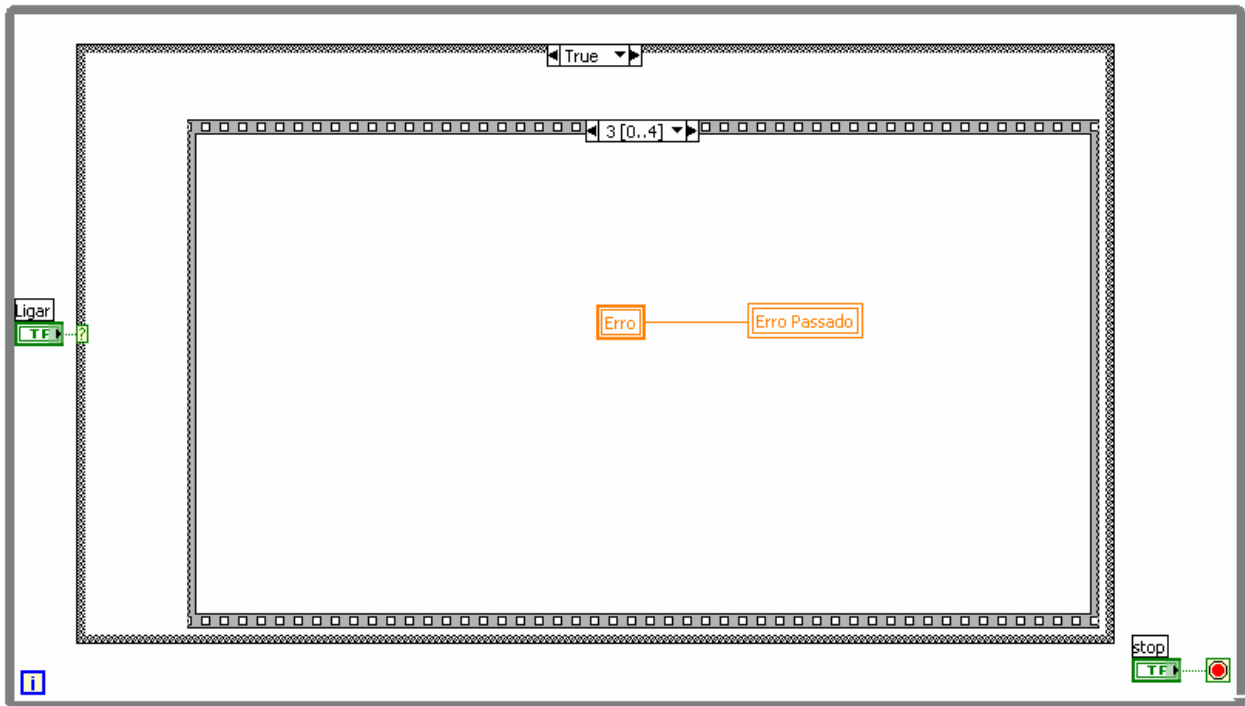
Nessa tela do programa o valor de voltagem é lido e comparado com outra voltagem ajustada pelo usuário. A partir dessa diferença será determinado se a válvula deve abrir ou fechar.



A soma dos três termos do controle devem ser enviados para o programa.



O erro sendo acumulado.



O sistema envia uma voltagem para o Roboteq.

